

Gratfreies Reiben – Wunsch oder Realität¹

Dr.-Ing. Erdmann Knösel, Dipl.-Ing. Jörg Münzner

1 Einleitung

Es bestand die Aufgabe für das Verfahren Reiben eine gratfreie Bearbeitung am Werkstoff 16MnCr5 an einer vorgefertigten Bohrung mit einer Fase von jeweils 45 ° am Eintritt der Reibahle und am Austritt der Reibahle zu fertigen. Das Werkzeug war vorgegeben und hatte den Durchmesser 7,158 mm bei einer Schnitttiefe von 50µm. Es standen die beiden Verschleißzustände der Werkzeuge zur Verfügung im arbeitscharfen Neuzustand und in einem Verschleißzustand wo nach dem Reibvorgang eine erhebliche Gratbildung am Reibahlenaustritt zu verzeichnen war. Für diesen Verschleißzustand des Werkzeuges bestand die anspruchsvolle Aufgabe am Bohrungsaustritt keinen Grat zu erreichen oder zumindest die Grathöhe zu minimieren.

Die Aufgabe wurde in zwei Hauptteile gegliedert. Es wurde im ersten Teil untersucht, ob durch eine gezielte Variation der Schnittparameter die Zielstellung bereits erreichbar ist bzw. es war festzustellen, bis auf welche Grathöhe eine Gratminimierung möglich ist. Im zweiten Teil wurden makrogeometrische Veränderungen am Werkzeug vorgenommen, um das Ziel zu erreichen. Eine besondere Bedeutung erlangt dabei die Gratbildung durch die Vorbearbeitung der Bohrung vor dem Reiben.

2 Gratminimierung durch Schnittparametervariation

Nach dem Reiben ist Grat an der Werkzeugaustrittsseite der Bohrung feststellbar (Bild 1). Die Gratbildung ist darauf zurückzuführen, dass der Werkstückwerkstoff am Bohrungsaustritt nicht mehr genügend Widerstand gegenüber den Zerspankräften aufbringen kann und somit der Reibahle einfach ausweicht. Als Ergebnis bildet sich Grat am Übergang Bohrung-Fase.

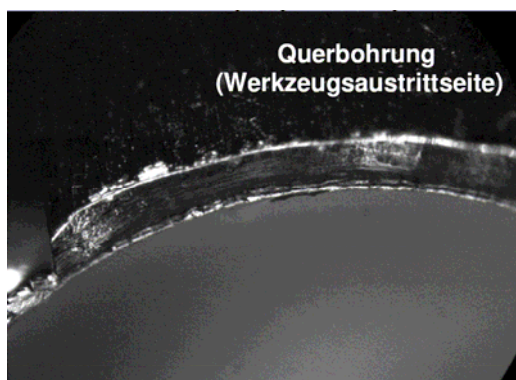


Bild1: Grat an der Werkzeugaustrittsseite der Bohrung

Die Gratbildung entstand mit folgenden Schnittparametern:

- Schnittgeschwindigkeit $v_c = 67,46\text{m/min}$
- Vorschub $f = 0,1\text{mm}$
- Vorschub pro Zahn $f_z = 0,017\text{mm}$
- Spanungsdicke $h = 0,012\text{mm}$.

¹ Auftragsforschung Industrie

Im Weiteren wurde festgestellt, dass sich vor dem Reibvorgang Grat in der Bohrung und am Übergang Bohrung-Fase befindet. Es war zu vermuten, dass sich die Gratbildung beim Vorbohren mit der Gratbildung beim Reiben additiv überlagert. Aus diesem Grund erfolgt unter gleichen Schnittparametern die Fertigung von Werkstücken, bei denen vor dem Reiben ein Entgraten und kein Entgraten der Fas- und Aufbohrgrate durchgeführt wird.

Aufgrund der zur Verfügung stehenden Werkzeuge ist eine Entfernung dieser Grate an der Querbohrung nur manuell durch einen Dreikantschaber möglich. Mit dem Werkzeug wurde am Werkstück beidseitig durch eine Drehbewegung entlang der Bohrungskante der Fas- und Aufbohrgrat abgetrennt.

Die Schnittparametervariation erfolgte in zwei Varianten.

2.1 Beibehaltung konstante Spannungsdicke

Bei Versuchen mit konstanter Spannungsdicke soll geprüft werden, ob durch eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit die Grathöhe gesenkt werden kann. Dies setzt voraus, dass der Vorschub über die ganze Versuchsreihe konstant gehalten wird. Mit der Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit wird der Werkstückwerkstoff auf die Möglichkeit einer Quasiwerkversprödung untersucht.

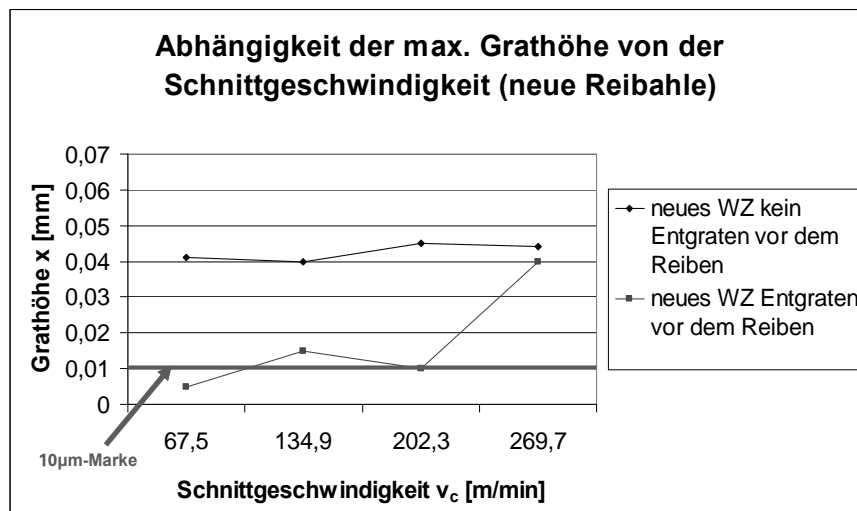
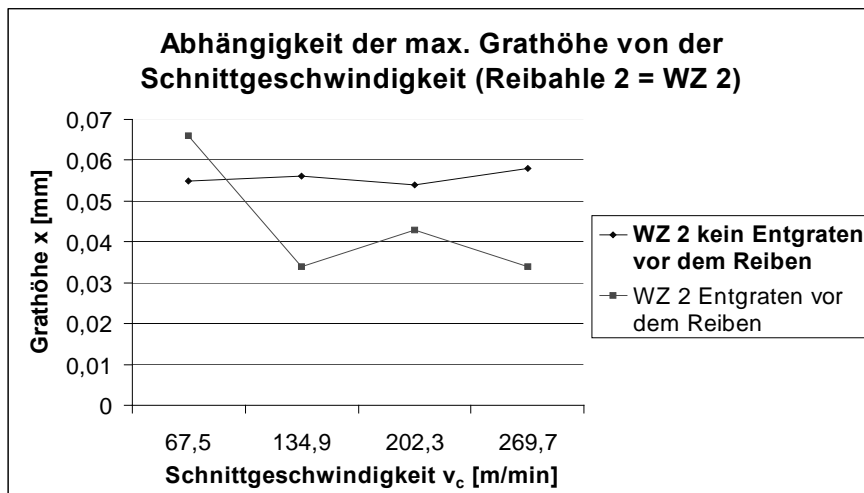


Bild 2: Vergleich der Grathöhe zwischen neuer und verschlissener Reibahle

Die Versuchsdurchführung erfolgt mit einer neuen und drei ausgesonderten Reibahlen. Mit den ausgesonderten Reibahlen soll mit steigender Schnittgeschwindigkeit die Möglichkeit einer Senkung der Grathöhen untersucht werden. Bei der Versuchsdurchführung mit der neuen Reibahle wird geprüft, ob die maximale Grathöhe gesenkt werden kann. Je Drehzahlstufe werden vier Werkstücke gerieben, von denen zwei vor dem Reiben zu entgraten sind. Folgende Ergebnisse wurden erzielt (Bild 2).

Die Grathöhen befinden sich trotz Steigerung der Schnittgeschwindigkeit auf konstant hohem Niveau. Daraus kann geschlossen werden, dass eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bis auf 269,7m/min bei den nicht entgrateten Werkstücken zu keiner Senkung der Grathöhe führt.

Ab einer Schnittgeschwindigkeit v_c von 134,9m/min sind die Grathöhen bei entgrateten Werkstücken im Vergleich zu den nicht entgrateten Werkstücken um ca. 0,015mm kleiner.

Die Abbildung zeigt die ermittelten Grathöhenverläufe bei der Versuchsdurchführung mit einer neuen Reibahle. In dieser Abbildung wird besonders im Ist-Zustand der Einfluss der Entgratung vor dem Reiben deutlich. Die große Differenz zwischen den beiden Grathöhen ist auf die Verwendung einer neuen Reibahle und dem damit verbundenen kleinen Reibgrat zurückzuführen. Die Erhöhung ist auf den Initialverschleiß an der Reibahle zurückzuführen.

Durch eine Entgratung vor dem Reiben konnte mit Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit nur eine geringfügige Senkung der Grathöhe erreicht werden. Die gewünschte Werkstoffversprödung führte zu keinem Erfolg. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Werkstoff zu zäh für eine derartige Werkstoffversprödung ist und dadurch keine drastische Senkung der Grathöhe erzielt werden kann.

2.2 Veränderung der Spannungsdicke

Durch die Variation der Spannungsdicke soll zum einen untersucht werden, wie sich eine Unterschreitung der Mindestspannungsdicke auf die Grathöhe auswirkt. Zum Anderem wird über eine Erhöhung der Spannungsdicke versucht den Zerspananteil zu steigern und somit ein Ausweichen des Werkstückwerkstoffes zu verhindern.

2.2.1 Versuchsdurchführung mit neuer Reibahle

In diesem Versuch wird die Spannungsdicke von 0,002 stufenweise bis 0,059 mm gesteigert. Die Versuche müssen mit einer neuen Reibahle durchgeführt werden, weil die in Abbildung errechneten Spannungsdicken nur mit einem neuen Werkzeug zu gewährleisten sind. Im Weiteren ist an jedem Werkstück eine Entgratung vor dem Reiben notwendig, damit untersucht werden kann, wie sich eine Veränderung der Spannungsdicke auf die Grathöhe auswirkt. Je Vorschubstufe erfolgt die Fertigung von zwei Werkstücken.

Im ersten Abschnitt sind die Grathöhen im Vorschubbereich von 0,02 bis 0,04mm im Vergleich zum zweiten Abschnitt höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den Vorschubstufen die Spannungsdicken sehr klein sind. Es muss davon ausgegangen werden, dass bei den Vorschüben die Mindestspannungsdicke unterschritten wird und theoretisch keine Spanabnahme mehr erfolgt. Die Schneide dringt nicht mehr in den Werkstückwerkstoff ein, sondern sie verformt ihn elastisch und plastisch so, dass er ausweicht. Dieser Vorgang ist mit einer erhöhten Gratbildung am Übergang Bohrung-Fase verbunden.

2.2.2 Versuchsdurchführung mit verschlissener Reibahle

Mit ausgesonderten Reibahlen wird untersucht, ob durch eine Erhöhung des Vorschubs eine Verringerung der Grathöhe möglich ist. Es erfolgt eine Steigerung des Vorschubs f von 0,1 auf 0,5mm. Je Vorschubstufe erfolgt die Fertigung von zehn Werkstücken. Davon werden fünf Werkstücke vor dem Reiben entgratet. Somit wird, der Einfluss der Fas- und Aufbohrgrate auf die Grathöhe nach dem Reiben nochmals untersucht.

Es ist festzustellen, dass trotz Vorschubsteigerung, und der damit verbundenen Vergrößerung der Spannungsdicke, keine Änderung der Grathöhe auftritt. Die Spannungsdicke h steigt von 0,007mm (bei $f = 0,06\text{mm}$) auf 0,035mm (bei $f = 0,3\text{mm}$). Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass praktisch durch die Erhöhung der Spannungsdicke das Ausweichen des Werkstückwerkstoffs nicht verhindert werden kann und somit keine Senkung der Grathöhe möglich ist.

In Bild 3 wird durch eine Gegenüberstellung der Grathöhen von entgrateten und nicht entgrateten Werkstücken vor dem Reiben gezeigt, wie sich die Fas- und Aufbohrgrate auf die Grathöhe nach dem Reiben auswirken können. Hierbei symbolisiert ein Balken die maximal gemessene Grathöhe an einem Werkstück.

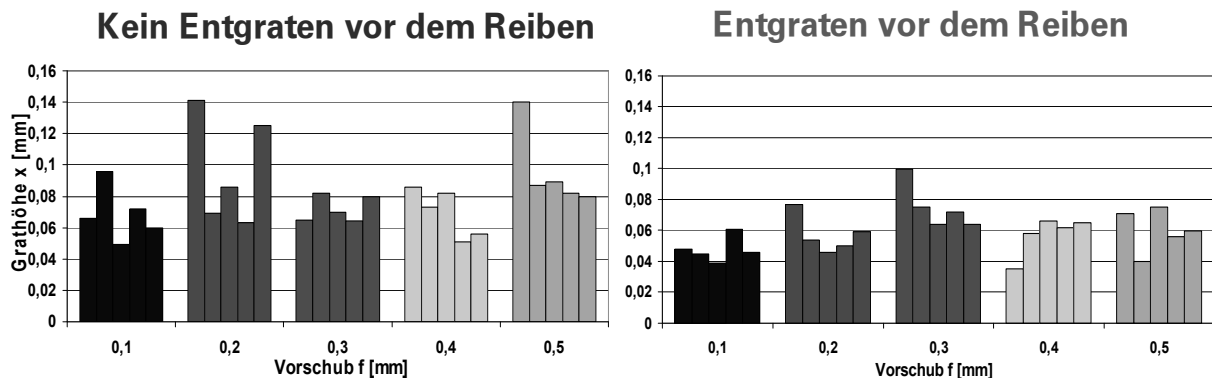


Bild 3: Einfluss des manuellen Entgratens vor dem Reiben auf den Reibgrat

Aus der Abbildung ist zu erkennen, dass im Diagramm „Kein Entgraten vor dem Reiben“ größere Grathöhen als im Diagramm „Entgraten vor dem Reiben“ auftreten. Es konnte, wie bei den Versuchen mit konstanter Spannungsdicke, eine Addition der Fas- und Aufbohrgrate mit dem Reibgrat nachgewiesen werden. Durch Erhöhung des Vorschubs und der damit verbundenen größeren Spannungsdicke ist keine drastische Absenkung der Grathöhe feststellbar. Die Theorie, durch eine Erhöhung der Spannungsdicke den für die Gratbildung verantwortlichen Anteil der plastischen Verformung zu senken, konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden. Vielmehr wird aus den Diagrammen deutlich, dass die Grathöhe unabhängig vom Vorschub und der Spannungsdicke ist.

2.2.3 Versuchsdurchführung mit neuer Reibahle

Eine wesentliche Minimierung der Gratbildung beim Reiben der Querbohrung ist auch mit einer neuen Reibahle nicht zu erreichen. Weder eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit, noch die Steigerung des Vorschubes mit veränderter Spannungsdicke, führen zum Erfolg.

3 Versuchsvarianten mit makrogeometrieveränderten Werkzeugen

Dazu wurden 4 Ansätze verfolgt. Die Untersuchungen integrieren makroskopische Änderungen der Werkzeuggeometrie und technologische Modifikationen der Schnittparameter.

Zur Auswertung der Grathöhe kommen Sichtprüfung, optische Auflichtmikroskopie, Tastschnittmessungen und Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zum Einsatz.

3.1 Abhängigkeit zwischen Grathöhe und Schnitttiefe der Reibahle

Die Höhe des Restmaterialsteges wird von der Schnitttiefe der Reibahle festgelegt. Wird die Schnitttiefe nicht größer als eine vorgegebene Grathöhe gewählt, so kann der Reibgrat diese Restriktion nicht überschreiten.

Die Versuche wurden daher durch eine Variation der Vorbohrdurchmesser für eine schrittweise Reduzierung der Schnitttiefe bis auf 10µm ausgelegt. Derzeit werden die Bohrungen mit einer Schnitttiefe von 50µm gerieben. Um diesen Arbeitspunkt wurden die Schnitttiefe wie folgt variiert:

- 0,13; 0,75; **0,5**; 0,029; 0,015; 0,01 mm
- Um die feine Stufung abhängig vom Durchmesser der zu fertigenden Bohrung zu realisieren wurden Wendelbohrer mit definierter Durchmesserstufung eingesetzt.

Ergebnisse:

Zur Bearbeitung wurden eine verschlissene und eine neue Reibahle eingesetzt. Die Ergebnisse sind im folgenden für die verschlissene Reibahle exemplarisch dargestellt.

Die Messung der Grathöhe erfolgte im Folgenden in den Punkten, die qualitativ betrachtet die größte Grathöhe aufwiesen. Kontrollmessungen am Bohrungsumfang außerhalb dieser Punkte wurden stochastisch durchgeführt.

Parallel zu Grathöhenvermessung erfolgte eine Messung der Rauheit der Bohrungsfläche. Die Ergebnisse sind im Bild 4 zusammengestellt.

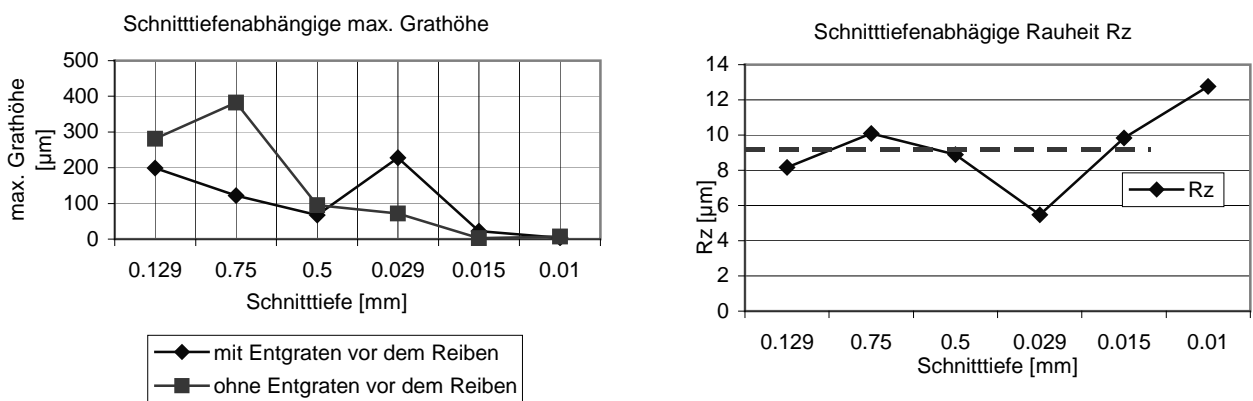


Bild 4 Vergleich der schnitttiefenabhängigen Grathöhe und Rauheit

Die Ergebnisse bestätigen die Annahme, dass mit sinkender Schnitttiefe die Grathöhe ebenfalls sinkt. Wird die Bohrung vor dem Reiben entgratet ist eine weitere Reduzierung der Grathöhe möglich.

Die extreme Reduzierung der Schnitttiefe auf 15µm führt dazu, dass aufgrund der Vorbohrtoleranzen die Reibahle nicht mehr zuverlässig im Eingriff ist. Es werden nur

noch die Rauheitsspitzen der Bohrung angeschnitten, z.T. geglättet oder umformend durch die Bohrung gequetscht. Demzufolge steigt die Rauheit und es kommt zur Ausbildung von markanten Riefen. Die Riefen zerstören die Bohrungsoberfläche und führen zu einer Überschreitung der Rauheitsrestriktion von $R_z=10\mu\text{m}$. Der hohe Quetschanteil während des Eingriffes führt weiterhin zu einem hohen Verschleiß der Reibahle. Dieser Effekt trat bei allen drei getesteten Reibahlen auf.

Durch die Verringerung der Schnitttiefe ist die Einhaltung einer Grathöhenrestriktion möglich. Der Ansatz wurde jedoch nicht weiter verfolgt da unzulässig große Rauheiten auftraten.

Die Untersuchungen zeigen den großen Einfluss der Schnitttiefe auf die Grathöhe.

3.2 Umformtechnische Gratbeseitigung durch eine Reibahle mit Drückeinheit

Das Werkzeug nach Bild wurde zweistufig aufgebaut. Es besteht aus der Reibstufe und einer nachgelagerten Drückeinheit bestehend aus 3 um 120° versetzt angeordnete Drückelemente. Die Drückelemente sind flexibel gelagert, sodass sie beim Durchfahren der Bohrung auf den Bohrungsdurchmesser zusammengedrückt werden. Nach dem Durchfahren der Bohrung weiten sich die federnden Drückelemente auf, sodass sie im Rückzug den Grat an der Fase umformend beseitigen sollen. Mit diesem neuartigen Werkzeug wurden jedoch keine zufriedenstellende Ergebnisse erzielt

3.3 Beseitigung des Reibgrates

Es wurde die Frage untersucht, inwieweit es möglich ist, die Fasbearbeitung dazu einzusetzen den Reibgrat zu entfernen. Das Fasen als letzten Arbeitsschritt bietet tendenziell folgende Vorteile:

- Geringere Schnitttiefe des Faswerkzeuges erzeugt erwartungsgemäß einen kleinen Grat
- Addition der Grathöhen im Ergebnis geringer als beim Reiben nach dem Fasen, da das Reiben tendenziell größere Grate erzeugt,
- Reibgrat wird vollständig bei der Fasenerzeugung entfernt.

Ergebnisse: Die Fertigung der beiden Fasen (am Bohrungsein- und -austritt) erfolgte nach dem Reiben. In den Voruntersuchungen konnte bereits eine Reduzierung der Grathöhe festgestellt werden.

Es zeigte sich, dass mit steigendem Vorschub die Grathöhe sinkt (Bild 5).

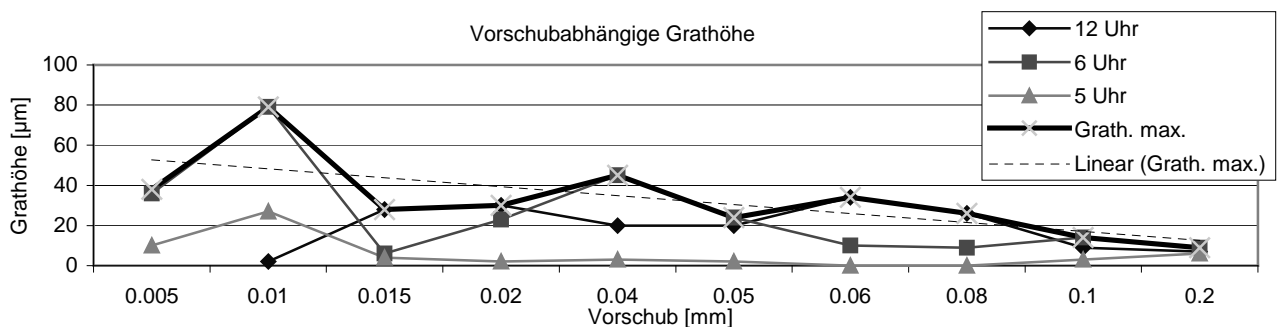


Bild 5: Einfluss des Vorschubs auf die Grathöhe beim Fasen

Im Bild 6 sind typische Gratformen der Fasbearbeitung, wie sie durch das Tastschnittverfahren ermittelt werden konnten, dargestellt. Im linken Bild ist

erkennbar, dass der Reibgrat vollständig durch das Fasen entfernt werden kann. Im oberen Bild ist ein Fasgrat dargestellt der in die Bohrung hineinragt. Es ist anzunehmen, dass die Grathöhe mit steigendem Werkzeugverschleiß zunimmt.

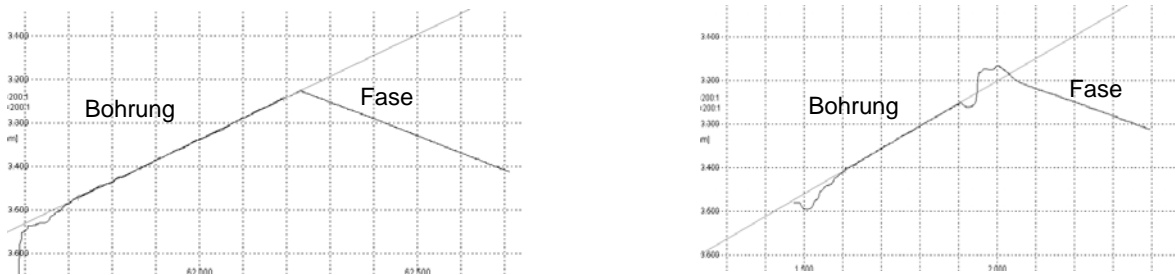


Bild 6: Typische Gratformen durch das Fasen

3.4 Optimierung des Reibahlenaustrittes

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Gestaltung der Fase und der Fasbearbeitung eine zentrale Bedeutung zur Reduzierung der Grathöhe zukommt.

Eine Reduzierung der Schnitttiefe über die gesamte Bohrungstiefe war nicht erfolgreich. Daher sollte der Ansatz untersucht werden, die Schnitttiefe nur innerhalb eines sehr kurzen Abschnitts der Bohrung zu reduzieren.

Die Größe der zweiten Fase wurde im NC-Programm durch die radiale Aussteuerung des Werkzeuges festgelegt. Für einen unkomplizierten Versuchsbetrieb und eine einfache Änderung der Fasengeometrie wurde die Fasentiefe als Parameter zur NC-Programmerstellung hinterlegt. Zunächst erfolgte eine Fasbearbeitung ohne Reiben um die Ausbildung der Fase zu analysieren.

Ergebnisse:

Die Auswertung ergab, dass im Übergangsbereich der ungeriebenen Bohrung zur zweiten Fasstufe kein Grat entsteht. Im Weiteren wurde der Übergangsbereich nach dem Reiben analysiert. Die folgende Darstellung zeigt den Übergang zwischen der geriebenen Bohrungswand und der zweiten Fasstufe. Die Bearbeitung erfolgte mit einer neu entwickelten Reibahle und einer verschlissenen Referenzreibahle. Ein Grat konnte im Bereich der Auflösung des Tastschnittmessgerätes ($1\mu\text{m}$) nicht nachgewiesen werden. Selbst die verschlissene Referenzreibahle erzeugte mit der neuen Fasgeometrie keinen messbaren Grat.

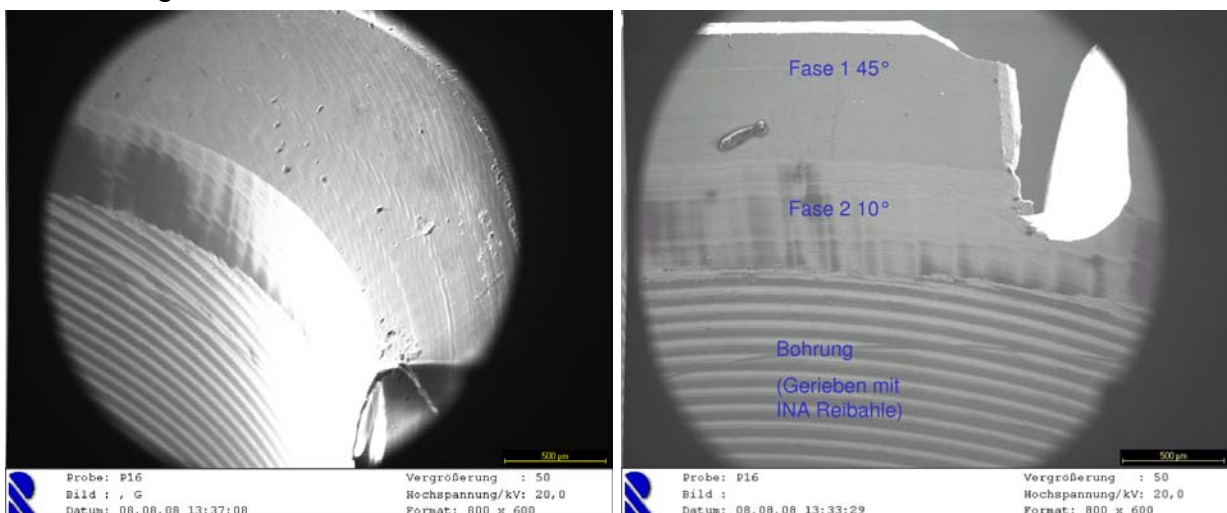


Bild 7: REM-Aufnahme des gratfreien Übergangs zwischen Bohrung und Fase

Um die Auflösungsgrenze zu erweitern, wurden der Übergangsbereich zwischen Bohrung und Fase mittels Rasterelektronenmikroskop untersucht (Bild 7). Die Aufnahmen ermöglichen eine qualitative Analyse des Übergangsbereiches innerhalb eines großen Bereiches. Lediglich an den, von der Reibahle erzeugten Rauheitsspitzen, ist eine Gratbildung in der Größenordnung von 1-2µm erkennbar.

Die zweite Fasstufe besitzt ausschließlich die technologische Funktionalität der kontinuierlichen Schnitttiefenreduktion. Die Tiefe der Fase kann so gefertigt werden, dass sie durch die Reibahle nahezu vollständig wieder entfernt wird. Der Traganteil der Bohrungsoberfläche entspricht damit wieder der konstruktiven Vorgabe. Die Fase erfüllt ihre gratreduzierende Funktion solange ein geringer Restanteil der Fase nicht durch die Reibahle entfernt wird.

Auswahl der Technologie

Die untersuchten vier Ansätze führen prinzipiell zu einer Verringerung der Grathöhe im Vergleich zur derzeit eingesetzten Serienbearbeitung.

Die Restriktionen eines nicht in die Bohrung ragenden Grades wurden nur durch die zweistufige Ausführung der Fasengeometrie erreicht.

4 Zusammenfassung

Da eine alleinige Schnittparametervariation und Geometrieänderung der Reibahle nur einen eingeschränkten Erfolg in Aussicht stellte, wurde auch die Bohrungsvorbearbeitung vor dem Reiben und die Bearbeitung der Fase in die Untersuchungen einbezogen.

Die umformtechnische Beseitigung des Grades durch ein kombiniertes Reib- und Entgratwerkzeug waren nicht erfolgreich, da der, von der Reibahle erzeugte Grat nicht durch die zu schwach dimensionierte Entgrateinheit entfernt werden konnte. Eine Weiterentwicklung dieses Werkzeuges bietet an dieser Stelle Potenzial zur Reduzierung der Grathöhe.

Die Beseitigung des Reibgrades durch das Fasen als letzten Arbeitsschritt erzeugt wiederum einen geringen Grat, der im Unterschied zum Reibgrat in die Bohrung hineinragt. Dieser Fall ist auszuschließen. Daher wurden Untersuchungen für diesen Ansatz nicht weiter verfolgt. Die Untersuchungen zeigten aber, dass die beim Fasen erzeugte Grathöhe von den Schnittwerten abhängig ist und durch eine Optimierung die Grathöhe ein Minimum erreicht.

Die durchgeführten Untersuchungen bestätigten den Zusammenhang, dass mit sinkender Schnitttiefe der Reibahle die erzeugte Grathöhe ebenfalls sinkt. Diese Erkenntnisse wurden zur Entwicklung einer technologisch optimierten zweistufigen Fasgeometrie genutzt. Die neu eingeführte zweite Fasstufe hat die Aufgabe, innerhalb einer definierten Strecke die Schnitttiefe kontinuierlich zu reduzieren. Zur Erzeugung der zweistufigen Fase wurde ein entsprechendes Faswerkzeug entwickelt. Innerhalb der Auswertung der unter Laborbedingungen mit der neuen Fasgeometrie gefertigten Proben konnte kein messbarer Grat nach dem Reiben nachgewiesen werden. Die Bewertung der Grathöhe erfolgte qualitativ durch lichtmikroskopische und Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen sowie quantitativ durch Tastschnittmessungen.